

부유식 해상태양광 발전을 위한 단위 플랫폼 구조물의 실해역 성능평가

나경원^{1)*} · 추진훈²⁾ · 이병준³⁾

Field Performance Test of Unit Platform Development for Offshore Floating Photovoltaic Power Structure

Kyoung Won Na^{1)*} · JinHun Choo²⁾ · Byung Jun Lee³⁾

Received 31 May 2021 Revised 11 August 2021 Accepted 19 August 2021 Published online 9 September 2021

ABSTRACT Recently, the Korean government announced a plan to activate renewable energies, with focus on clean energy sources such as solar and wind power as the core and the goal of achieving carbon neutrality by 2050. Unlike other photovoltaic (PV) systems, offshore PV installations are advantageous for large-scale expansion because of the ease of securing sites; they also enable lowering the power generation costs based on construction of large-scale power facilities of megawatt class or higher owing to low noise and landscape damage. However, any power generation should proceed with consideration of the special environmental conditions of the ocean. Above all, when installing large-scale facilities, it is important to reduce fluctuations of the structure and secure stability to actively respond to waves. This study is concerned with the development of a floating body technology that actively responds to waves so as to enable commercialization of offshore solar power. A unit platform for research and development on offshore PV generation was installed in the Saemangeum sea, and the structural fluctuations and stability were analyzed to ensure conformity with the major performance indicators.

Key words Floating photovoltaic(부유식 태양광), Offshore floater(해상 부유체), Field performance test(실해역 성능평가), Motion response(운동응답)

Nomenclature

L : length, mm

W : width, mm

D : diameter, mm

T : thickness, mm

Dire : direction, °

$S_z(w)$: response spectrum

$S_\zeta(w)$: wave spectrum

λ : scale factor

H_E : expected wave height

H_p : present wave height

1) Senior Researcher, Noksan Headquarters, Korea Marine Equipment Research Institute

2) Principal Researcher, Noksan Headquarters, Korea Marine Equipment Research Institute

3) Principal Researcher, Oceanspace, CO., LTD.

*Corresponding author: kwna@komeri.re.kr

Tel: +82-51-400-5281

Fax: +82-51-400-5270

Subscript

DAQ : data acquisition

IMU : inertial measurement unit

MCU : micro controller unit

- H : wave height
- Tp : wave period
- RMS : root mean square
- FFT : fast fourier transform
- RAO : response amplitude operator

1. 서론

전 세계적으로 지구 온난화와 일본 원전 사고로 인해 기후 변화에 대응 가능하고 안전하게 에너지를 사용할 수 있는 방안 마련에 전념하고 있다. 파리협정이 체결된 2015년 이후 세계 에너지 설비투자의 65.7%(178 GW)가 재생에너지에 투자되었고, 특히 태양광 발전과 풍력 발전이 대부분을 차지하고 있다. 최근 우리 정부도 2050년 탄소중립을 목표로 태양광과 풍력 등의 청정에너지를 핵심으로 한 재생에너지 활성화하겠다는 계획을 발표하였다.^[1]

태양광 발전의 확산을 위해서는 발전부지 확보가 관건이며, MW급 대규모 태양광 개발은 환경 영향이 적은 건물의 옥상 또는 수상 및 해상 태양광으로 개발을 유도하고 있는 실정이다. 해상 태양광의 경우 옥상에 비해 부지확보가 쉬워 대규모화에 유리하고 소음·경관 피해가 적으며 대규모 해상태양광 발전단지 조성 시 발전단가도 내려가는 효과가 있다. 그러나 해상태양광의 상용화를 위해서는 해상이라는 가혹한 환경조건으로 인해 파도, 바람, 해수(염분) 등을 고려한 개발이 진행되어야 한다. 또한 여러 개의 단위 플랫폼을 연결하여 대규모의 형태로 설치하였을 경우, 구조물이 파랑 하중에 대한 동요 저감과 파도에 능동적으로 대응할 수 있어야 한다. 우리나라 서해안과 남해안은 수심이 낮고 다도해라 파고가 낮아 우리 국토의 8%에 달하는 80 만 ha 정도가 해상 태양광에 이용 가능한 것으로 분석되고 있으며, 실제로 해당 지역에서 많은 실증시험들이 수행되고 있다.

본 연구는 부유식 해상 태양광 발전의 MW급 대규모 단지 조성을 위한 단위 플랫폼(1unit) 실증시험에 관한 것이다. 전라북도 군산시 비응항 인근에서 해상 태양광 발전을 위한 단위 플랫폼 실증시험을 수행하여 목표로 설정한 주요 성능 지표와의 부합 여부를 검증하였다. 또한 앞서 수행

한 모형시험 결과와 비교 분석하여 시제품의 동요 저감성 및 안정성을 확인하였다.

2. 실증시험

2.1 실증시험 모델

단위 플랫폼(1unit) 시제품 제원은 가로 10 m, 세로 11 m 및 높이 4 m이며, 발전용량은 약 13kW급 규모이다. 상부판넬에는 태양광 모듈 모형을 15도 각도로 탑재되어 있다. 계류선은 나일론 소재로 직경 40 mm의 4점 계류를 적용하였으며, 앵커는 2.46 tonf standard stockless 적용하여 고정하였다. 시제품의 상세 제원은 Table 1과 같다.

해상실증 장소는 전라북도 군산시 새만금 해역 내 비응항 인근이며 전면 수심 7.8m, 해역(N: 33°53'42.78", E: 126°31'9.94")이다. 해당 위치에서 작업을 수행하기 위해 사전에 허가신청서를 제출하였고, 검토 및 심의를 거쳐 사용승인을 득하였다. 배치도 및 설치위치는 Fig. 1과 같다.

플랫폼은 공장에서 일부 대조립 및 수밀테스트를 진행한 후에 육로로 운송 하였고, Fig. 2와 같이 비응항 인근에서 상부 조립, 계류라인 연결 및 공기압 시험 등을 수행한 후 안벽인양에서 진수작업까지 완료하였다.

Table 1. Properties of offshore PV unit platform

Item		Size
Total weight (ton)		12,09
Vertical column	L (mm)	4,040
	D (mm)	711
	T (t)	7
Horizontal column	L (mm)	8,200
	D (mm)	406
	T (t)	7
Topside pannel (mm)		11,000 * 10,000 *2t
Damping plate (mm)	D (mm)	1,400
	T (t)	10
Draft (mm)		2,040
Center of gravity (mm)		2,400
L*W*D (mm)		11,000 * 10,000 * 4,700
Mooring line	Type	Nylon 3 S/Trope
	D (mm)	40



Fig. 1. Test site



Fig. 2. Installation of offshore PV

2.2 계측장비

Fig. 3은 해상태양광 플랫폼의 데이터 측정을 위한 계측 장비 구성이며, 파랑 측정을 위한 파고계와 부유체 동요 측정을 위한 센서 모듈로 구성된다. 계측장비의 주요제원은 Table 2와 같다.

Fig. 4는 실제 시험에 사용된 파고계와 동요측정 센서 모듈을 나타내고 있다. 파고계는 Nortek사의 AWAC 초음

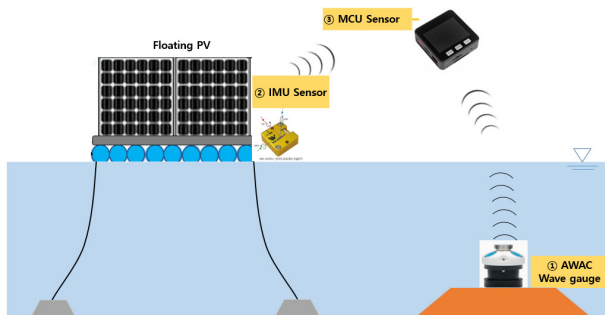


Fig. 3. Configuration of test equipment

Table 2. Properties of test equipment

No	Item	Spec
①	Wave Gauge	- Model: AWAC-600 kHz - Weight : 5,6 kg - Height : 0,17 m - Diameter : 0,21 m
②	IMU sensor	- L,W,H : 29,6 mm, 31,4 mm, 10 mm - Weight : 2,0 g - Response Time < 1ms
③	MCU	- L,W,H :54 mm, 54 mm,18 mm - Weight: 47 g - Communication : RS-232 Wi-fi, Bluetooth



Fig. 4. Wave gauge and data recording system

파식을 이용하였고, 유속, 파고, 파향 등이 측정가능하다. 파고계는 아연합금으로 제작된 1.0 m*1.0 m*0.8 m 프레임에 장착되어 파랑을 측정하였다. 파고계는 태양광 플랫폼으로부터 100 m 위치에 설치하였다. 파랑은 2021년 3월 5일부터 2021년 4월 14일까지 42일간 매 1시간 간격으로 계측하였다.

동요 측정 장비인 IMU 센서 모듈은 구조물 중앙에 설치하여 X,Y,Z 축방향에 대한 가속도와 각 축에 대한 Roll, Pitch, Yaw 각도를 측정하였다. 센서로부터 출력되는 각도, 각속도, 가속도 데이터는 전용 데이터 로거(MCU)를 통해 저장되었다. 데이터 저장 및 일정 기간의 저장 데이터 백업을 위한 근거리 모듈이 데이터 저장 장치에 설치되나 실해역 시험의 특성상 무선 통신 백업은 사용하지 않고 직접 메모리 카드를 회수하여 데이터 백업을 진행하였다. 또한 배터리 용량이 클수록 많은 데이터를 확보 할 수 있지만 제한된 공간에서 설치 안정성 및 부유체의 무게를 고려하였을 때 최소한의 용량으로 가능한 최대의 효과를 얻는 것이 유리하므로 4,000 mAh 배터리 모듈 2개를 탑재하였다.

해상 태양광 플랫폼의 동요 측정을 위한 좌표계는 Fig. 5 시제 좌표계와 실해역 시험 좌표계에 따라서 횡동요(Roll),

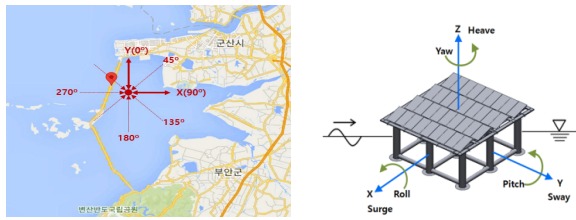


Fig. 5. Coordinate system configuration

종동요(Pitch), 상하동요(Heave)가 설정되며, 파고 데이터의 경우 정북방에서 오는 파를 기준(0 deg)으로 시계방향으로 회전하며 원점으로 들어오는 각도를 파의 방향으로 설정하였다.

3. 결과

3.1 파랑측정 결과

파랑은 선박, 해안 시설물, 해양구조물에 파랑하중과 상호간섭 그리고 운동을 발생시키는 중요한 에너지원이다. 따라서 해양구조물에 작용하는 외력을 측정하는데 있어 파랑 특성을 파악하는 것은 매우 중요하다.

파랑 데이터는 시간당 1개의 결과를 얻도록 설정 하였으며, 실증시험기간인 42일 동안 총 980개의 데이터를 획득 하였다. 관측 결과 유의파고는 0.3 m 이하 파고가 98.0%를 차지하였으며 0.3 m~0.5 m 이하 파고의 출현율은 2.0%로 나타났다. 주기는 1.0~2.0초가 75.2%로 가장 많이 출

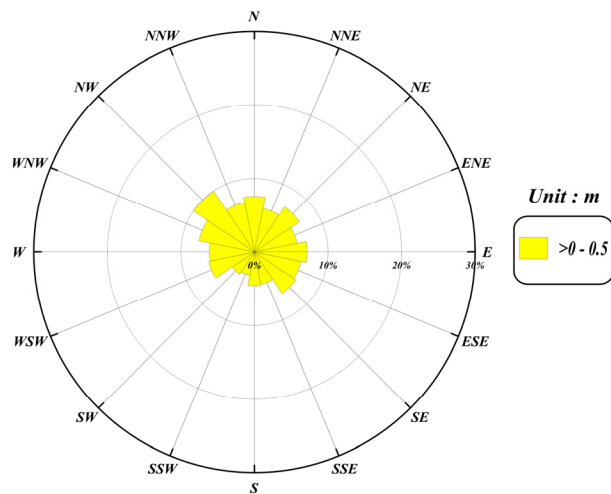


Fig. 6. Occurrence rate of wave direction

현하였고, 2.0~3.0초가 21.8%의 출현율을 보였다.

파향은 주방향에 관계없이 해상 태양광 플랫폼 주변에서 전방위에 걸쳐 파도가 형성되는 것을 확인하였다. 특히 북서(NW)방향이 9.96%로 가장 높은 출현율을 보였으며 다음으로 북(N)방향과 서북서(WNW)방향의 파향이 7.57%로 높은 출현율을 나타냈다. 관측기간 중 최대유의파고는 0.38 m, 동남동(ESE) 파향으로 관측되었다. Fig. 6은 실증기간 동안 측정된 실증해역의 파랑 장미도 이다.

3.2 실증시험 결과

획득한 980개의 파랑 데이터 전부를 분석하기에는 많은 시간이 소요되며, 앞서 수행한 모형실험과의 비교를 위해 파고 0.2 m, 주기 2.0초 이상 조건에 대해 12개의 CASE로 우선 분류하였다. Table 3은 해당 조건에 부합하는 데이터를 정리 및 분석한 것이다.

0.20 m, 0.25 m, 0.30 m, 0.35 m, 0.38 m의 5개 파고에 대해 파주기에 따른 부유식 해상 태양광 플랫폼의 동요 데이터를 분석하였으며, 각 주기별 횡동요, 종동요 각도와 상하 가속도 동요 측정값의 RMS 값을 정리하였다. 실증

Table 3. Unit platform RMS data

CASE	H (m)	Tp (s)	Dir (°)	RMS		
				Heave (G)	Pitch (°)	Roll (°)
1	0.20	2.41	166.36	0.0039	0.48	0.78
2	0.20	2.09	137.53	0.0035	0.60	1.00
3	0.25	2.03	290.79	0.0036	0.59	0.71
4	0.25	2.20	217.81	0.0034	0.21	0.47
5	0.25	2.19	263.24	0.0034	0.23	0.23
6	0.25	2.04	348.37	0.0036	0.18	0.73
7	0.25	2.10	272.50	0.0033	0.16	0.52
8	0.30	2.41	141.21	0.0572	1.93	1.70
9	0.30	2.08	40.60	0.0037	0.63	0.90
10	0.30	2.37	272.90	0.0055	0.45	0.98
11	0.30	2.30	86.08	0.0034	0.26	0.45
12	0.30	2.27	179.98	0.0037	0.47	0.23
13	0.30	2.17	143.74	0.0039	0.16	0.36
14	0.30	2.24	100.95	0.0034	0.15	0.67
15	0.35	2.38	75.46	0.0041	0.55	0.23
16	0.38	2.43	111.26	0.0040	0.08	0.32
17	0.38	2.50	126.56	0.0038	0.13	0.30

시험 기간 동안 횡동요 및 종동요의 최대 RMS 각도는 각각 1.9°, 1.7°였으며, 상하동요 가속도 RMS는 0.0572 G로 나타났다.

태양광 판넬 및 지지구조의 안전기준에서 부유체 횡동요는 RMS 기준 15도 이하를 만족하여야 하며 가속도는 RMS 기준 0.4 G 이하를 만족하여야 한다. 본 연구에서 각각의 목표치를 5° 이하, 0.3 G 이하로 설정하고 해당 지표에 만족하는지를 확인한 결과 목표 값에 부합하는 것을 확인하였다.

부유체의 동요응답은 모형시험과 같은 파향을 갖는 CASE6과 CASE12 조건에서 비교 분석 하였다.

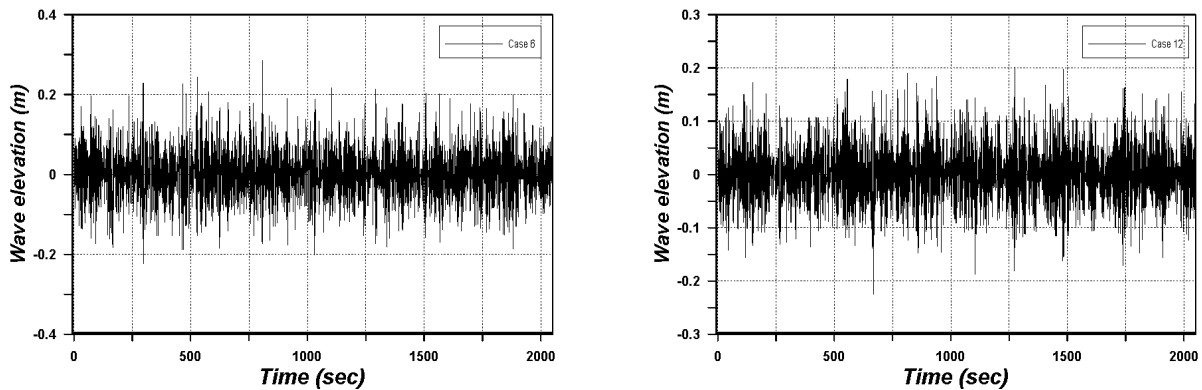
해상은 Sin함수와 Cos함수의 조합인 수만가지의 불규칙 파로 구성되어 있는데, 이렇게 여러 함수들의 합성으로 구성되어있는 신호는 시간영역(Time domain)에서 해석하기 상당히 어려우므로 시간영역이 아닌 주파수영역(Frequency domain)으로 분석하면 기존의 복잡한 신호에 어떤 주파수 성분이 어떤 강도로 포함되어있는지 분석이 가능하다.^[2]

파고의 시계열 응답과 구조물의 시계열 동요응답을 정석적으로 평가하기 위해 고속 푸리에 변환(FFT: Fast Fourier Transform)을 통해 주파수영역으로 도출하였고, 에너지 밀도를 나타내는 스펙트럼으로 변환하였다.

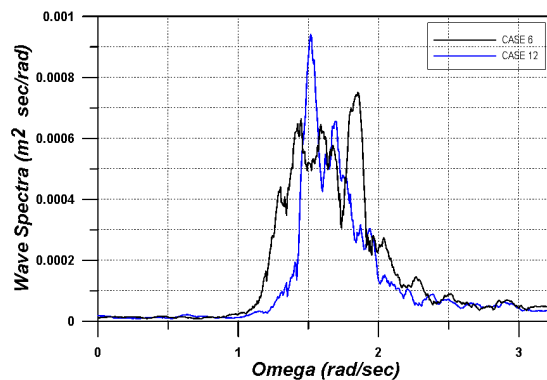
Fig. 7은 CASE6과 CASE12에 대한 실증시험의 파고 시계열 그래프와 FFT를 통해 변환한 파고의 스펙트럼이다. 해당 시간동안 측정된 파고의 RMS는 CASE6과 CASE 12 각각 0.06 m, 0.07 m로 측정되었으며, 스펙트럼 분석에서 최대 피크 주파수는 약 1.5 rad/s와 1.8 rad/s에서 발생하는 것을 확인하였다.

Fig. 8의 왼쪽은 CASE6과 CASE12의 횡동요, 종동요, 상하 가속도 동요의 시계열 그래프이며, 오른쪽은 해당 시계열 그래프를 스펙트럼으로 변환하여 나타낸 것이다.

시계열 데이터를 분석해보면 CASE 12는 CASE 6에 비해 횡동요와 종동요에서 응답 폭이 넓은 범위에 걸쳐 나타났고, 스펙트럼 분석에서도 CASE 12의 운동이 다소 크게 발생하고 있음을 알 수 있었다. 응답의 폭은 존재하였지만



(a) Wave elevation times series for Case 6 (left) and Case 12 (right)



(c) Wave spectrum for Case 6 (left) and Case 12 (right)

Fig. 7. Time series and wave spectrum (Case 6, Case 12)

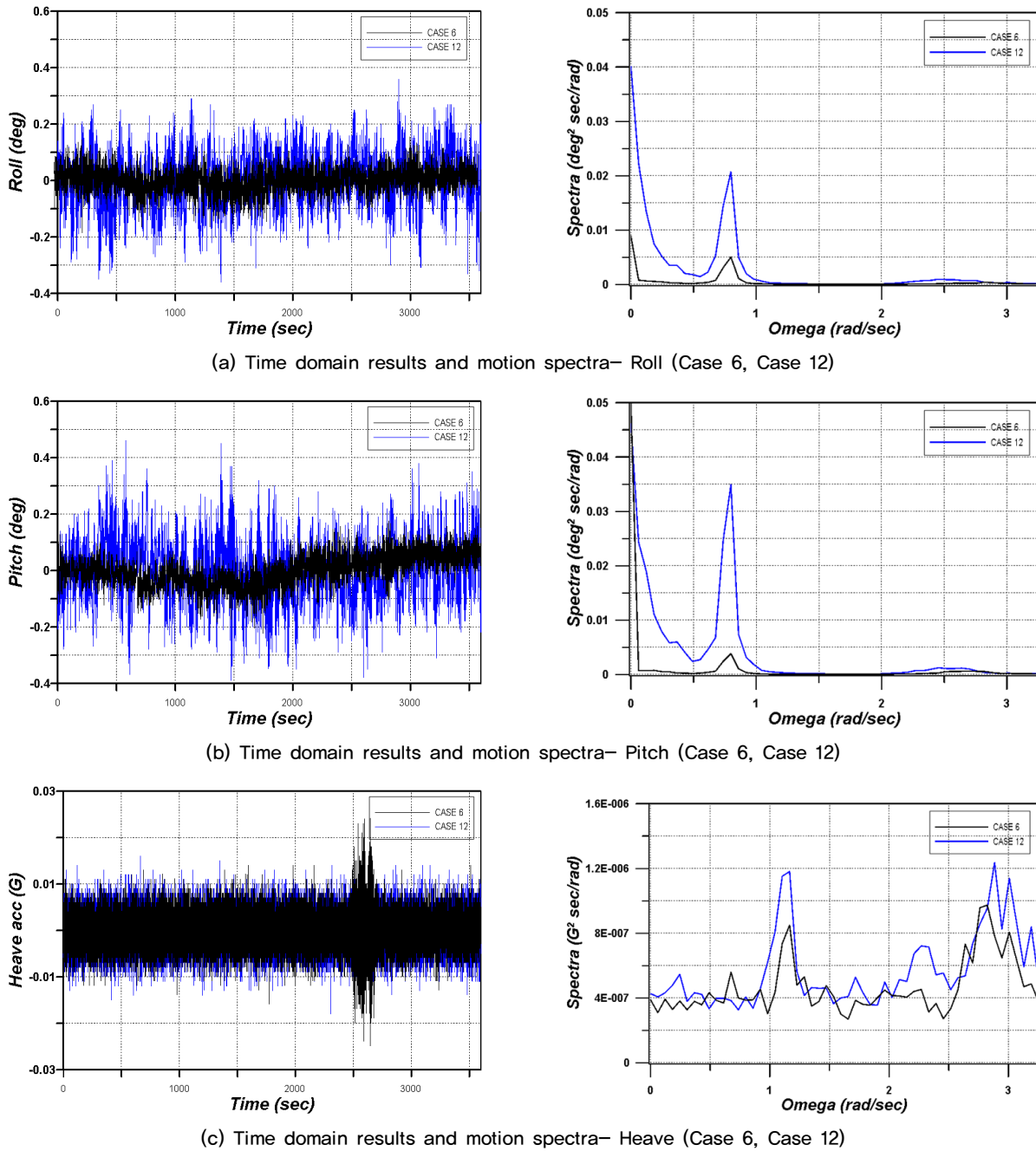


Fig. 8. Time domain results and motion spectra

대체적으로 유사한 운동응답 특성을 보이며 저주파수 영역 0.8 rad/s에서 공진점이 발생하는 것을 알 수 있었다.

상하가속도 동요의 시계열 그래프와 스펙트럼을 분석한 결과, CASE 12의 경우 상대적으로 넓은 범위의 응답폭을 나타내었지만 유의미한 결과값은 아니었다. 다만 상하가속도 동요의 경우 전반적으로 0에 가까운 낮은 값을 나타내고

있는데 이는 상하 운동이 매우 작았음을 의미하고, 수면에 위치한 직경이 큰 폰툰의 영향으로 방사 및 점성 감쇠력이 증가하였기 때문으로 판단된다.

3.3 모형 및 실증시험 비교

Fig. 9는 앞서 분석한 실증시험(CASE 6, CASE 12)과

1/18로 축소 제작한 모형과의 운동응답 결과를 비교한 그래프이다. 여기서 세로축은 플랫폼의 운동특성, 즉 운동크기를 나타내는 RAO(Response Amplitude Operator)이며 세로축은 Wave Frequency(Omega)로 파랑의 특성을 나타내는 지표이다.

부유체의 동요응답과 주어진 해역의 파랑 스펙트럼 연산을 통해 구할 수 있으며 관계식은 다음과 같다.

$$RAO(w) = \sqrt{\frac{S_z(w)}{S_c(w)}} \quad (1)$$

$RAO(w)$: Response amplitude operator

$S_z(w)$: Response spectrum

$S_c(w)$: Wave spectrum

일반적으로 부유체의 운동 RAO는 규칙파 실험으로부터 넓은 주파수 영역대를 포함하기 위해 많은 양의 모형 시험이 요구되며, 불규칙파 실험은 넓은 주파수 범위 내에 여러 개의 주파수들을 갖는 파를 중첩하여 실시하므로 1회의 실험만으로 주파수 변화에 따른 운동 RAO를 쉽게 구할 수 있다.^[3,4] 본 연구에서는 규칙파에서 실험한 모형실험의 RAO 결과값(+)과 실증 시험 결과 값을 비교하였다.

실증시험에서 CASE 6와 CASE 12 조건들의 각 운동응답들은 진폭의 차이는 발생했지만 유사한 형상을 가지며 응답하는 것을 확인하였다.

모형시험에서 횡동요는 CASE 6(Hs=0.25 m)의 대부분의 주파수 영역에서 운동응답이 서로 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었고, 중동요는 CASE 12(Hs=0.3 m)에서의 결과 값이 정성적으로 일치하는 경향을 보였다. 횡동요와 중동요 운동의 공진점은 저주파수인 장주기 방향에서 영역에서의 높게 발생하였는데 댐핑플레이트의 영향으로 공진 운동응답이 저감되어 나타난 것을 확인할 수 있었다.

모형실험에서 상하동요 가속도의 최대 피크값은 약 0.9 G/m 였으며, 그 외의 주파수영역에서는 0.3 G/m 미만의 값을 보여주고 있다. 반면 실증시험에서는 실해역의 파고가 매우 낮은 관계로 0.2 G/m 이하의 매우 낮은 운동응답 경향을 보였고 유의미한 공진점도 발생하지 않았다. 실증 시험 장소의 해상파고가 예상했던 파고(Hs=2.5 m)와 달리 너무 낮은 파고가 형성되어 상하동요도 낮게 측정되었고, 이로 인해 모형시험과의 차이가 발생하였다. 만약 해당 해역에서 좀 더 높은 유의 파고가 발생한다면, 아래 Froude 상사의 법칙을 적용하여 모형시험과 유사한 운동응답 특성을 가질 것을 유추해 볼 수 있다.

$$\lambda = \frac{H_E}{H_P} \quad (2)$$

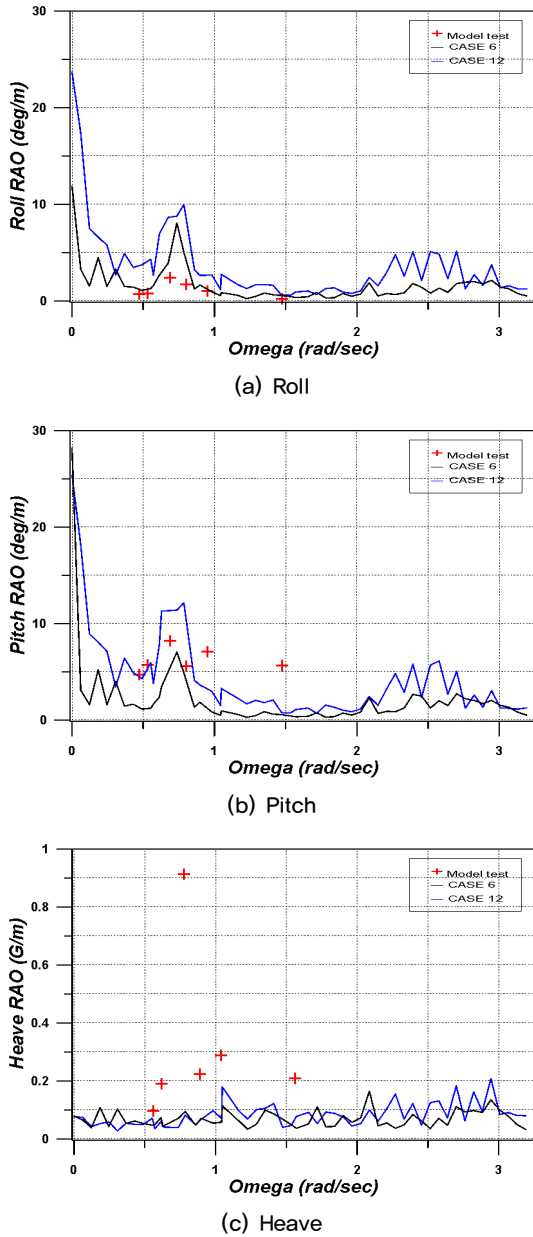


Fig. 9. Comparison of roll, pitch and heave RAOs between field test and experiments

λ : Scale factor

H_E : Expected wave height

H_p : Present wave height

4. 결론

본 연구는 해상 태양광 발전을 위한 단위 플랫폼에 관한 것으로 주요 성능지표 만족여부와 모형시험 결과와 비교분석하였다.

실증해역에서 측정된 파랑 데이터를 분석하여 유의미한 값을 가지는 5개의 파고 및 파주기를 추출하여 각 주기별 횡동요 및 종동요 각도와 상하동요 가속도 측정값의 RMS를 분석한 결과, 부유체 횡동요는 5° 이하, 가속도는 0.3 G 이하의 목표 값에 만족하는 것을 확인하였다.

실증시험에서 단위 플랫폼의 동요응답들은 CASE 6($H_s=0.25$ m)와 CASE 12($H_s=0.3$ m) 조건에서 유사한 패턴을 가지며 응답하는 것을 확인하였다. 횡동요는 CASE 6($H_s=0.25$ m) 조건에서 모형시험 운동응답 결과 값과 대부분의 영역에서 대체로 일치하는 경향을 보였고, 종동요는 CASE 12($H_s=0.3$ m) 조건에서 정성적으로 일치하는 경향을 보였다. 또한 실증시험과 모형시험 모두 저주파수 영역에서 공진응답이 발생하는 것을 확인하였다. 실증시험 장소의 낮은 파고 발생으로 인해 상하동요 가속도 응답은 거의 발생하지 않아 대체로 0에 가까운 낮은 운동응답을 보였는데 이로 인해 모형시험과 차이가 발생하였다.

모형시험에서 공진점은 저주파수인 장주기 방향에서 영역에서의 높게 발생하였는데 댐핑플레이트의 영향으로 공진 운동응답이 저감되어 나타난 것을 확인 할 수 있었다.

실증시험과 모형시험 결과의 차이는 존재하였지만 목표 RMS 기준 이내를 만족하며 안정적인 운동을 하는 것을 확인하였다.

본 연구결과는 향후 MW급의 대용량의 부유식 해상태양광 구조물 개발을 위한 기초자료로 사용 가능할 것으로 평가되며, 유사 해양 프로젝트 수행시 참고 자료가 될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2020년도 해양수산부의 재원으로 해양수산과학기술진흥원(KIMST)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20190297).

References

- [1] Republic of Korea, 2030, “2050 carbon neutral strategy of the Republic of Korea”, https://www.gihoo.or.kr/netzero/download/LEDS_REPORT.pdf.
- [2] Park, B.J, and Hur, J., 2015, “A Study on the method for analyzing wind power outputs through fast fourier transform (FFT)”, Proceedings of the 46th KIEE Summer Conference, pp. 87-88.
- [3] Koh, H.J., Kim, J.R., and Cho, I.H., 2013, “Model test for heave motion reduction of a circular cylinder by a damping plate”, J. Ocean Eng. Technol., **27**(4), 76-82.
- [4] Choi, Y.R., Kim, J.H., and Kim, Y.S., 2005, “An analysis of rolling performance for a barge-type FPSO”, J. Ocean Eng. Technol., **19**(3), 25-30.